第 40 卷 第 1 期
2022 年 3 月
天 文 学 进 展
PROGRESS IN ASTRONOMY
Vol. 40, No. 1
Mar., 2022

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2022.01.08

北斗三号系统 *SISA* 参数用户使用算法及性能评估

杨 戬[1,2]，曹月玲[1]

(1. 中国科学院 上海天文台，上海 200030；2. 中国科学院大学，北京 100049)

摘要： 2020 年 7 月 31 日上午，北斗三号全球卫星导航系统正式开通。随着北斗系统的逐步完善以及精度的不断提升，用户对北斗系统的完好性要求也越来越高。北斗三号系统在广播星历中利用 $SISAI_{\mathrm{oe}}$, $SISAI_{\mathrm{ocb}}$, $SISAI_{\mathrm{oc1}}$ 和 $SISAI_{\mathrm{oc2}}$ 这 4 个参数表示星历和钟差参数精度，但是目前 4 个 *SISAI* 参数尚未在接口控制文件 (Interface Control Document, ICD) 中给出用户算法，使北斗三号系统的完好性服务不能应用于实际。研究了北斗三号系统基本完好性参数 *SISAI* 的等级转换算法和用户使用算法，并根据国际民航组织 (International Civil Aviation Organization, ICAO) 非精密进近 (Non-Precision Approach, ICNPA) 阶段完好性要求，利用国际 GNSS 监测评估系统 (International GNSS Monitoring and Assessment System, IGMAS) 全球网实测数据和北斗三号卫星广播星历中 *SISAI* 参数，对北斗三号系统的完好性服务性能进行了初步验证分析。试验结果表明，随着北斗三号系统组网完成，利用 *SISA* 参数转换和用户使用算法，北斗三号系统 NPA 阶段完好性服务能力为 100%。

关 键 词： 北斗三号系统；完好性；*SISA* 参数；包络

中图分类号： P228 **文献标识码：** A

1 引 言

全球卫星导航系统 (Global Navigation Satellite System, GNSS) 服务性能的主要指标包括精度、完好性、连续性和可用性。其中导航系统完好性是指在导航系统提供的导航信息不能满足服务性能要求时 (导航系统发生故障或者误差超限，无法用于导航定位)，给用户提供及时告警的能力。完好性是衡量卫星导航系统是否可靠的一个重要指标，随着全球卫星导航系统服务精度的不断提升，应用范围不断扩大，关系用户使用安全的系统完好性问题，越来越受到重视，各 GNSS 系统都将系统完好性建设作为系统升级的重要工作之一[1−3]。

收稿日期： 2021-05-07； **修回日期：** 2021-05-26

资助项目： 国家自然科学基金 (12173072, 41674041, 11203059)

通讯作者： 曹月玲，caoyueling@shao.ac.cn

卫星导航系统的完好性监测手段主要包括卫星自主完好性监测 (Satellite Autonomous Integrity Monitoring, SAIM)、地面完好性监测 (GNSS Integrity Channel, GIC) 和接收机自主完好性监测 (Receiver Autonomous Integrity Monitoring, RAIM)。其中，卫星导航系统的建设方主要依靠 GIC 和 SAIM 技术实现系统的完好性监测，而 RAIM 技术则通过用户接收机算法完成对故障卫星的识别。GIC 技术是指在利用系统布设的地面监测站，收集导航卫星的观测数据，对导航电文的空间信号精度进行预测和监测，生成相应的完好性电文，并随导航电文一起播发给用户，用户利用完好性电文参数对卫星健康状态和导航系统播发信息的可靠性进行判断[4−6]。SAIM 技术则是在导航卫星上直接对本星信号的异常进行监测，根据监测结果，播发卫星信号健康标识，电文参数简单，告警实时性高，是下一代卫星导航系统完好性监测的重要手段[7,8]。RAIM 技术是接收机在利用所接收的多颗导航卫星观测量进行定位处理的同时，采用最小二乘法或奇偶空间矢量算法原理对多星冗余观测量进行故障卫星的检测和排除分析处理[7]，该技术一般只能针对单卫星较大故障进行监测，而且会降低系统可用性，因此完好性监测能力相对较弱。

BDS, GPS, Galileo 等 GNSS 导航系统向用户播发的完好性电文参数中，一类重要信息为广播星历的卫星轨道和钟差的预测精度信息。由于监测体制和电文设计不同，各 GNSS 系统播发的完好性电文参数并不相同。早期系统实现，通常用一个完好性电文参数表示卫星轨道和卫星钟差的综合径向预测精度，随着系统完好性监测能力提升，进一步考虑卫星轨道和卫星钟差的不同误差特性，采用不同的完好性参数分别反映卫星轨道和卫星钟差的电文精度。其中 GPS 系统播发导航电文中利用 $URAI$ (User Range Accuracy Index) 数反映广播星历空间信号预测精度，在新设计播发的 CNAV (Civil Navigation) 电文中，利用 $URAI_{\rm ed}$, $URAI_{\rm ned0}$, $URAI_{\rm ned1}$, $URAI_{\rm ned2}$ 这 4 个参数，分别表示星历切平面预报误差、星历径向与钟偏预报误差、钟速预报误差和钟漂预报误差[9]；Galileo 系统和 BDS-2 (北斗区域系统) 系统分别利用 $SISAI$ (Signal In Space Accuracy Index) 参数[10] 和 $URAI$ 表示广播星历空间信号预测精度[8,11]；BDS-3 (北斗全球系统) 系统对完好性监测体制进行了全面升级，利用 $SISAI_{\rm oe}$, $SISAI_{\rm ocb}$, $SISAI_{\rm oc1}$, $SISAI_{\rm oc2}$ 这 4 个参数表示星历切平面预报误差、星历径向与钟偏预报误差、钟速预报误差和钟漂预报误差[12−14]。各 GNSS 系统在广播电文中播发的星历和钟差完好性电文参数和含义如表 1 所示。

表 1　GNSS 系统星历与钟差完好性电文参数对比

系统	完好性参数	含义
GPS (LNAV)	$URAI$	用户距离精度指数
GPS (CNAV)	$URAI_{\rm ed}$	轨道平面预测精度指数
	$URAI_{\rm ned0}$, $URAI_{\rm ned1}$, $URAI_{\rm ned2}$	卫星钟差预测精度指数
Galileo	$SISAI$	空间信号精度指数
BDS-2	$URAI$	用户距离精度指数
BDS-3	$SISAI_{\rm oe}$	卫星轨道的切向与法向精度指数
	$SISAI_{\rm ocb}$, $SISAI_{\rm oc1}$, $SISAI_{\rm oc2}$	$SISAI_{\rm ocb}$，卫星轨道的径向及卫星钟固定偏差精度指数；$SISAI_{\rm oc1}$，卫星钟频偏精度指数；$SISAI_{\rm oc2}$，卫星钟频漂精度指数

系统完好性的服务性能一般以告警限值、告警时间和危险误导信息 (Hazardously Misleading Information, HMI) 概率具体表示。告警限值是指对应飞行阶段保证安全操作的定位误差限值，分为水平告警限值 (Horizontal Alert Limit, HAL) 和垂直告警限值 (Vertical Alert Limit, VAL) 两类。告警时间是指从系统出现故障开始到用户收到告警所允许的最大时间延迟。HMI 概率是指当前定位值落在告警限值范围之外的飞行危险概率，一般要求不大于 10^{-7} h^{-1}[15,16]。由于涉及生命安全服务，航空用户对卫星导航系统完好性提出了最严格的要求，表 2 给出国际民航组织对民航各飞行阶段的导航完好性性能要求。

表 2　国际民航各阶段导航完好性性能需求表

飞行阶段	完好性		
	完好性风险	告警限值/m	告警时间/s
非精密进近 (NPA)	$10^{-7}h^{-1}$	556 (HAL)	10
有垂直引导进近 (APV-I)	2×10^{-7} 每次进近	556 (HAL); 50 (VAL)	10
有垂直引导进近 (APV- II)	2×10^{-7} 每次进近	40 (HAL); 20 (VAL)	6
CAT I 精密进近	2×10^{-7} 每次进近	40 (HAL); 20 (VAL)	6

如表 1 所示，各 GNSS 系统通过广播星历播发的完好性电文参数均是索引值，用户需要根据 GNSS 系统发布的用户接口控制文件将完好性参数索引值转换为具体的空间信号精度预测值，并根据用户算法进行应用。BDS-3 系统在 2018 年 12 月 27 日开通了基于 18 颗 MEO 卫星的基本服务，于 2020 年 7 月 31 日正式开通基于 24MEO/3IGSO/3GEO 星座的全球服务。目前 BDS-3 系统尚未在其 ICD 中给出各 $SISAI$ 索引参数的等级转换关系[17]，也未给出 $SISA$ 参数的用户应用算法。本论文设计了 BDS-3 系统 $SISAI$ 参数的等级转换算法及用户应用算法，基于定位域，研究了 $SISA$ 参数的完好性评估方法。利用 IGMAS 全球监测网实测数据，对比不同阶段 BDS-3 系统完好性服务能力，首次对 BDS-3 系统播发的 $SISA$ 参数的完好性性能进行了初步验证。

2　北斗三号系统 $SISAI$ 参数索引转换算法

受到导航电文播发带宽的限制，GNSS 系统发给用户的空间信号完好性参数均以等级索引值的形式表示。在 BDS-3 系统广播星历中，利用完好性参数 $SISAI$ 表达广播星历中卫星轨道和钟差的预报精度。卫星通过广播电文播发的完好性参数索引值包括：$SISAI_{\rm oe}$, $SISAI_{\rm oc1}$, $SISAI_{\rm oc2}$。用户在使用完好性参数前，需要将完好性参数的索引值转化为具体的预测精度值，目前北斗 ICD 中尚未发布各个参数专门的等级对应关系表。

因卫星轨道与钟差误差的特性不同，对不同位置用户的影响不同，其中卫星轨道切向与法向方向预报精度以 $SISAI_{\rm oe}$ 参数表达，卫星轨道径向及钟差预报精度以 $SISAI_{\rm oc}$ 参数表达。同时，根据钟差误差的二次模型特性，又将 $SISAI_{\rm oc}$ 参数进一步细化为 $SISAI_{\rm ocb}$，$SISAI_{\rm oc1}$ 和 $SISAI_{\rm oc2}$。$SISAI_{\rm ocb}$ 参数综合表示卫星钟偏差和卫星轨道径向误差，$SISAI_{\rm oc1}$ 表示卫星钟钟速误差，$SISAI_{\rm oc2}$ 参数表示卫星钟漂移误差。

其中 $SISAI_{oe}$ 索引值的范围 $-16\sim+15$，不同索引值表示的参数范围如表 3 所示。$SISAI_{ocb}$ 索引值范围也为 $-16\sim+15$，不同索引值表示的参数范围 $SISAI_{oe}$ 参数完全相同，不再赘述。$SISAI_{oc1}$ 和 $SISAI_{oc2}$ 参数范围为 $0\sim7$，表示 8 个等级，没有专门的等级对应关系表。

表 3　$SISAI_{oe}$ 索引关系表

$SISAI_{oe}$ 索引	$SISA_{oe}$/m	$SISAI_{oe}$ 索引	$SISA_{oe}$/m
15	$6\,144.00 < SISA_{oe}$	−1	$1.20 < SISA_{oe} \leqslant 1.70$
14	$3\,072.00 < SISA_{oe} \leqslant 6\,144.00$	− 2	$0.85 < SISA_{oe} \leqslant 1.20$
13	$1\,536.00 < SISA_{oe} \leqslant 3\,072.00$	−3	$0.60 < SISA_{oe} \leqslant 0.85$
12	$768.00 < SISA_{oe} \leqslant 1\,536.00$	−4	$0.43 < SISA_{oe} \leqslant 0.60$
11	$384.00 < SISA_{oe} \leqslant 768.00$	−5	$0.30 < SISA_{oe} \leqslant 0.43$
10	$192.00 < SISA_{oe} \leqslant 384.00$	−6	$0.21 < SISA_{oe} \leqslant 0.30$
9	$96.00 < SISA_{oe} \leqslant 192.00$	−7	$0.15 < SISA_{oe} \leqslant 0.21$
8	$48.00 < SISA_{oe} \leqslant 96.00$	−8	$0.11 < SISA_{oe} \leqslant 0.15$
7	$24.00 < SISA_{oe} \leqslant 48.00$	−9	$0.08 < SISA_{oe} \leqslant 0.11$
6	$13.65 < SISA_{oe} \leqslant 24.00$	−10	$0.06 < SISA_{oe} \leqslant 0.08$
5	$9.65 < SISA_{oe} \leqslant 13.65$	−11	$0.04 < SISA_{oe} \leqslant 0.06$
4	$6.85 < SISA_{oe} \leqslant 9.65$	−12	$0.03 < SISA_{oe} \leqslant 0.04$
3	$4.85 < SISA_{oe} \leqslant 6.85$	−13	$0.02 < SISA_{oe} \leqslant 0.03$
2	$3.40 < SISA_{oe} \leqslant 4.85$	−14	$0.01 < SISA_{oe} \leqslant 0.02$
1	$2.40 < SISA_{oe} \leqslant 3.40$	−15	$0 < SISA_{oe} \leqslant 0.01$
0	$1.70 < SISA_{oe} \leqslant 2.40$	−16	没有精度预测，使用有风险

对于 $SISAI_{oe}$ 和 $SISAI_{ocb}$ 参数，本文设计按照索引值等级范围内取标准偏差获得索引值对应的等级转换值，具体转换如式 (1) 所示：

$$\begin{cases} SISA_{oe/ocb} = 2^{(1+N/2)}\,, & (N \leqslant 6) \\ SISA_{oe/ocb} = 2^{(N-2)}\,, & (N > 6,\ \ N < 15) \\ SISA_{oe/ocb} = 2.8,\ 5.7,\ 11.3\,, & (N = 1,\ 3,\ 5) \end{cases}\quad, \tag{1}$$

其中，N 为表 3 中的索引参数值，式 (1) 中 N 小于 0 时取对应表 3 中各索引值对应精度的上限值。

对于 $SISAI_{oc1}$ 和 $SISAI_{oc2}$ 参数，索引值的等级值转换如式 (2) 所示：

$$\begin{cases} SISA_{oc1} = 2^{-(SISAI_{oc1}+14)} \\ SISA_{oc2} = 2^{-(SISAI_{oc2}+28)} \end{cases}\quad. \tag{2}$$

利用式 (1) 和式 (2)，可将导航电文中播发的各 $SISAI$ 等级索引值转换为具体的精度表示值。

3　$SISA$ 参数用户应用算法

用户在收到广播星历中完好性参数的索引值后，首先将索引值转换为具体的精度值。

对于卫星钟差的预报误差，由 3 个参数表示，需要按照钟差预报模型，利用索引转换后的 $SISA_{\rm ocb}$, $SISA_{\rm oc1}$ 和 $SISA_{\rm oc2}$ 参数计算卫星钟差的预报精度，如式 (3) 所示：

$$\begin{cases} SISA_{\rm oc} = SISA_{\rm ocb} + SISA_{\rm oc1}(t-t_{\rm op})\,, & t-t_{\rm op} \leqslant 93\,600 \\ SISA_{\rm oc} = SISA_{\rm ocb} + SISA_{\rm oc1}(t-t_{\rm op}) + \\ \qquad SISA_{\rm oc2}(t-t_{\rm op}-93\,600)^2\,, & t-t_{\rm op} > 93\,600 \end{cases} , \tag{3}$$

其中，t 为系统时间，$t_{\rm op}$ 为电文参考时间，单位都是秒。

用户获得 $SISA_{\rm oe}$ 和 $SISA_{\rm oc}$ 参数后，还需要根据误差特性计算 $SISA$ 综合参数，以反映广播星历的空间信号精度。根据轨道平面误差和轨道径向误差、钟差误差在用户最差位置方向的近似投影，采用式 (4) 表示 $SISA$ 综合参数：

$$SISA = \sqrt{(SISA_{\rm oe} \times \sin 14)^2 + SISA_{\rm oc}^2} \quad . \tag{4}$$

用户利用系统播发的完好性参数，计算定位保护限值，以反映根据观测量解算出来的位置结果的可靠性。系统的完好性服务性能可通过定位误差保护限值 (Protection Level, PL)、告警限值 (Alert Limit, AL) 和定位误差 (Position Error, PE) 这 3 个参数表达。定位误差是指用户利用观测数据和广播星历计算的位置与真实位置的偏差；定位保护限值是指用户利用系统播发的完好性参数计算的定位误差的保守估计；告警限值是指定位误差的告警门限，若计算的定位保护限值超过告警限值，则表示导航系统的服务“不可用”。告警限值是由导航定位服务的行业来确定，目前国际民航根据飞机航路的不同飞行阶段，给出了不同告警限值要求，如表 2 所示。PE, PL 和 AL 的关系如图 1 所示。

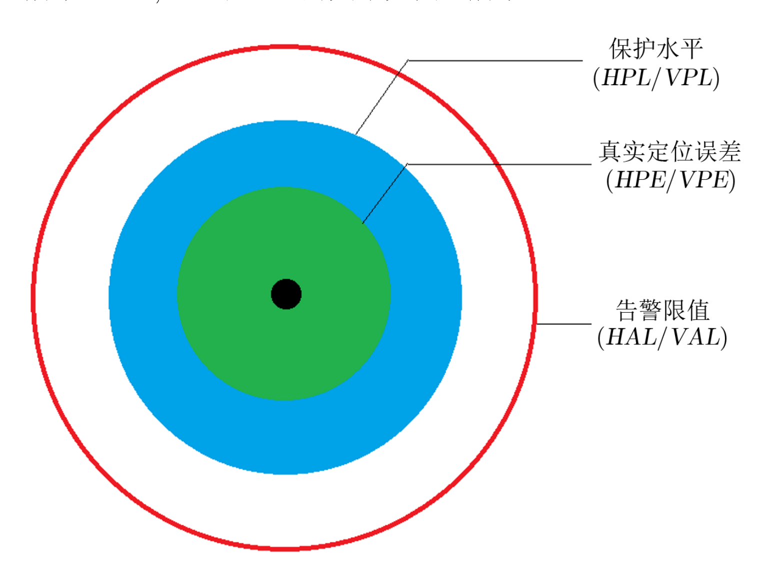


图 1 $PL/PE/AL$ 三者关系

在实际情况下，用户 (尤其是实时动态用户) 通常并不知道自己的真实位置，也就无法计算自己的导航定位误差，只能通过完好性参数计算相应的定位保护限值作为定位误差的

保守估计。而卫星导航系统需要确保，利用系统播发的完好性参数计算的保护限值应该大于用户真实的定位误差，若利用完好性参数计算的保护限值小于用户告警限值，但用户真实定位误差大于用户的告警限值，则表示发生了完好性风险事件。卫星导航系统最重要的完好性性能之一就是完好性风险概率。

在具体应用中，导航用户的定位误差又可分为水平定位误差 (Horizontal Position Error, HPE) 和垂直定位误差 (Vertical Position Error, VPE)，不同用户对水平和垂直方向的定位精度要求不同，因此将告警限值分为水平告警限值 (HAL) 和垂直告警限值 (VAL)。相应地用户利用完好性参数计算的保护限值也可分为水平保护限值 (Horizontal Protection Level, HPL) 和垂直保护限值 (VPL)。HPL 和 VPL 的具体计算公式如下[18]：

$$HPL = K_{\mathrm{H}}\sqrt{\frac{d_{\mathrm{east}}^2 + d_{\mathrm{north}}^2}{2} + \sqrt{\left(\frac{d_{\mathrm{east}}^2 - d_{\mathrm{north}}^2}{2}\right)^2 + d_{\mathrm{EN}}^2}} \quad , \tag{5}$$

$$VPL = K_{\mathrm{U}} \cdot \sqrt{d_{\mathrm{U}}} \quad , \tag{6}$$

式中，K_{H} 和 K_{U} 分别为根据系统完好性服务等级的水平风险概率 $P_{\mathrm{h,hmi}}$ 和垂直风险概率 $P_{\mathrm{v,hmi}}$ 得到的置信概率相对应的系数，根据国际民航公约附件 10[19]，飞机不同飞行阶段的完好性风险概率系数值为：$K_{\mathrm{H,NPA}} = 6.18$, $K_{\mathrm{H,PA}} = 6.0$, $K_{\mathrm{V,PA}} = 5.33$。式 (5), (6) 中 d_{ii} 为利用空间几何投影矩阵将伪距域视线方向残差投影到定位域的结果[18]，可表示为：

$$\begin{bmatrix} d_{\mathrm{east}}^2 & d_{\mathrm{EN}} & d_{\mathrm{EU}} & d_{\mathrm{ET}} \\ d_{\mathrm{EN}} & d_{\mathrm{north}}^2 & d_{\mathrm{NU}} & d_{\mathrm{NT}} \\ d_{\mathrm{EU}} & d_{\mathrm{NU}} & d_{\mathrm{U}}^2 & d_{\mathrm{UT}} \\ d_{\mathrm{ET}} & d_{\mathrm{NT}} & d_{\mathrm{UT}} & d_{\mathrm{T}}^2 \end{bmatrix} = (\boldsymbol{G}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{W}\boldsymbol{G})^{-1}\boldsymbol{G}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{W} \quad , \tag{7}$$

式中，$\boldsymbol{G}$ 为观测矩阵，第 i 行的元素为：

$$\boldsymbol{G} = \begin{bmatrix} -\cos(Ele)\sin(Azi) & -\cos(Ele)\cos(Azi) & -\sin(Ele) & 1 \end{bmatrix} \quad . \tag{8}$$

权矩阵 $\boldsymbol{W}$ 是对角阵，可表示为：

$$\boldsymbol{W} = \mathrm{diag}\left(\frac{1}{\sigma_{\mathrm{u},1}^2 + SISA_1^2} \quad \cdots \quad \frac{1}{\sigma_{\mathrm{u},N}^2 + SISA_N^2}\right) \quad , \tag{9}$$

其中，$SISA_i$ 表示各卫星的 $SISA$ 综合参数，由式 (4) 计算得到，σ_{u} 为传播段观测误差[16]，$\sigma_{\mathrm{u},i}^2 = \sigma_{\mathrm{air},i}^2 + \sigma_{\mathrm{tropo},i}^2$。

其中，用户设备误差 $\sigma_{\mathrm{air},i}$ 和对流层残余误差 $\sigma_{\mathrm{tropo},i}$ 由用户设备和对流层模型决定，表示如下：

$$\sigma_{\mathrm{tropo},i}^2 = \frac{1}{\sqrt{0.002 + \sin^2(\theta_i)}} \times 0.12 \quad , \tag{10}$$

$$\sigma_{\mathrm{air},i}^2 = 0.15 + \mathrm{rand}(0.07) \quad , \tag{11}$$

其中，θ_i 为高度角。

4 $SISA$ 参数完好性评估方法

BDS-3 系统完好性服务目标为满足民用航空非精密进近 NPA 阶段的完好性要求，NPA 服务主要关注水平方向的完好性服务能力。利用 IGMAS 全球分布监测的实测数据，按照斯坦福图[20]方法对北斗系统 $SISA$ 参数的完好性性能进行验证。如图 2 所示，按照斯坦福图评估方法，将系统的完好性服务性能划分为四种情况[8]：

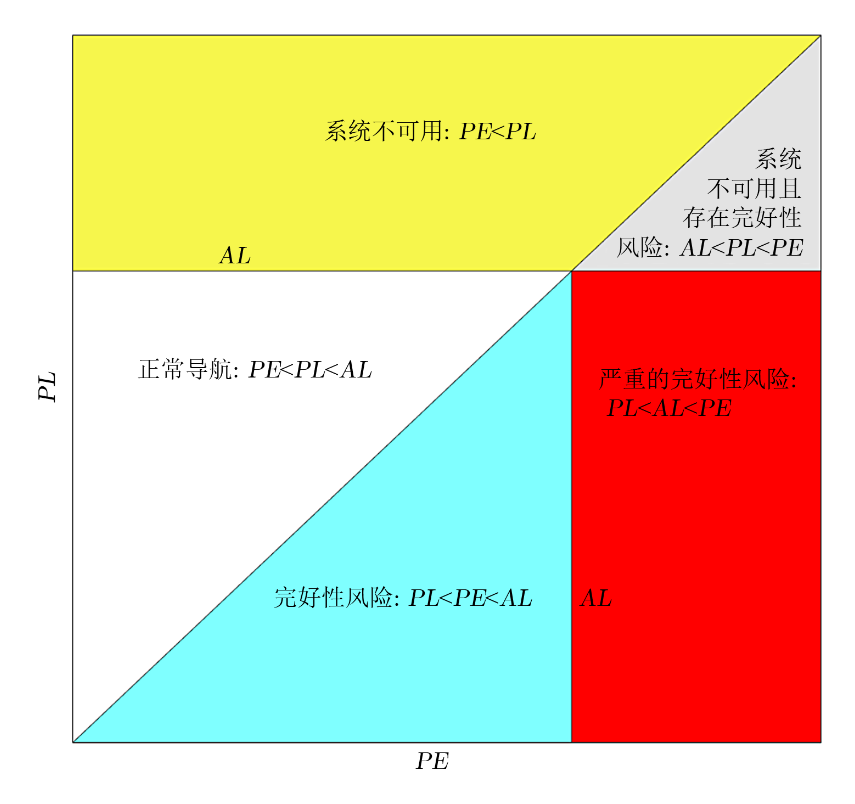


图 2 完好性斯坦福分析图[20]

(1) 当定位误差小于定位保护限值且定位保护限值小于告警限值时，即 $HPE < HPL < HAL$ 时，表示完好性服务“可用”，由图 2 中白色区域表示。

(2) 当定位误差大于定位保护限值，但定位误差小于告警限值时，即 $HPL < HPE < HAL$ 时，表示完好性服务出现了“漏警”，由图 2 中蓝色区域表示。

(3) 当定位误差大于告警限值，且定位保护限值小于告警限值时，即 $HPL < HAL < HPE$ 时，表示完好性服务出现了“严重的完好性风险”，图 2 中红色区域表示。

(4) 当定位保护限值大于告警限值时，即 $HPL > HAL$，表示导航服务“不可用”，由图 2 中黄色和灰色区域表示。其中黄色区域表示没有完好性漏警，灰色区域表示存在完好性漏警。

按照斯坦福图评估方法，选择测站坐标已知的观测数据进行系统完好性服务的评估。

IGMAS 测站的坐标可利用精密定位等方法进行精确标定，利用 BDS-3 系统播发导航电文计算各测站的位置，与精确坐标进行比较，可以获得各测站的导航定位误差：

$$POSerr = POS_{\text{post}} - POS_{\text{nav}} \quad , \tag{12}$$

式中，$POSerr$ 表示定位误差，POS_{post} 为事后精密标定的测站坐标，POS_{nav} 表示利用导航电文计算的测站坐标。

利用导航电文播发的 $SISA$ 参数，按照第 3 章方法计算水平保护限值 HPL，分别对完好性服务的可用性、漏警率、严重的完好性风险和服务不可用的概率进行统计分析。

BDS-3 系统的 NPA 完好性服务可用性评估方法为：

$$NPA = \frac{N(HAL > HPL > |(POSerr_{\text{H}})|)}{N_{\text{all}}} \quad . \tag{13}$$

BDS-3 系统的 NPA 完好性服务漏警概率分析，即分析水平定位误差大于水平保护限值，但小于水平告警限值的概率：

$$MI_{\text{H}} = \frac{N(HAL > |(POSerr_{\text{H}})| > HPL)}{N_{\text{all}}} \quad . \tag{14}$$

BDS-3 系统的 NPA 完好性服务完好性风险概率分析，即分析定位误差大于水平告警限值，定位保护限值小于水平告警限值的概率：

$$HMI_{\text{H}} = \frac{N(|(POSerr_{\text{H}})| > HAL > HPL)}{N_{\text{all}}} \quad . \tag{15}$$

BDS-3 系统的 NPA 完好性服务不可用概率分析，即分析定位保护限值大于告警限值，但定位误差小于定位保护限值的概率，不考虑漏警情况：

$$H_{\text{unavai}} = \frac{N(|(POSerr_{\text{H}})| < HPL \,\&\, HPL > HAL)}{N_{\text{all}}} \quad . \tag{16}$$

上面各式中，N 表示满足条件的样本个数，N_{all} 表示全部统计样本个数。

5　$SISA$ 参数完好性评估试验分析

本文利用 BDS-3 系统的基本完好性 $SISA$ 电文和 IGMAS 全球站观测数据，对 BDS-3 系统的 NPA 阶段完好性服务能力进行分析，验证基本完好性 $SISA$ 电文的完好性性能。根据 NPA 完好性服务指标要求，按照斯坦福图统计方法，评估 BDS-3 系统 NPA 完好性服务可用性及完好性服务风险。

利用 IGMAS 全球分布的 11 个测站北斗观测数据，系统完好性服务性能评估时间段为 2018 年 12 月至 2020 年 10 月，IGMAS 测站分布如图 3 所示。

按照 BDS-3 运行情况，将试验验证划分为基本系统阶段和完整系统两个阶段，计算 IGMAS 站的水平保护限值和水平定位误差，分析 BDS-3 系统不同建设阶段 NPA 完好性服

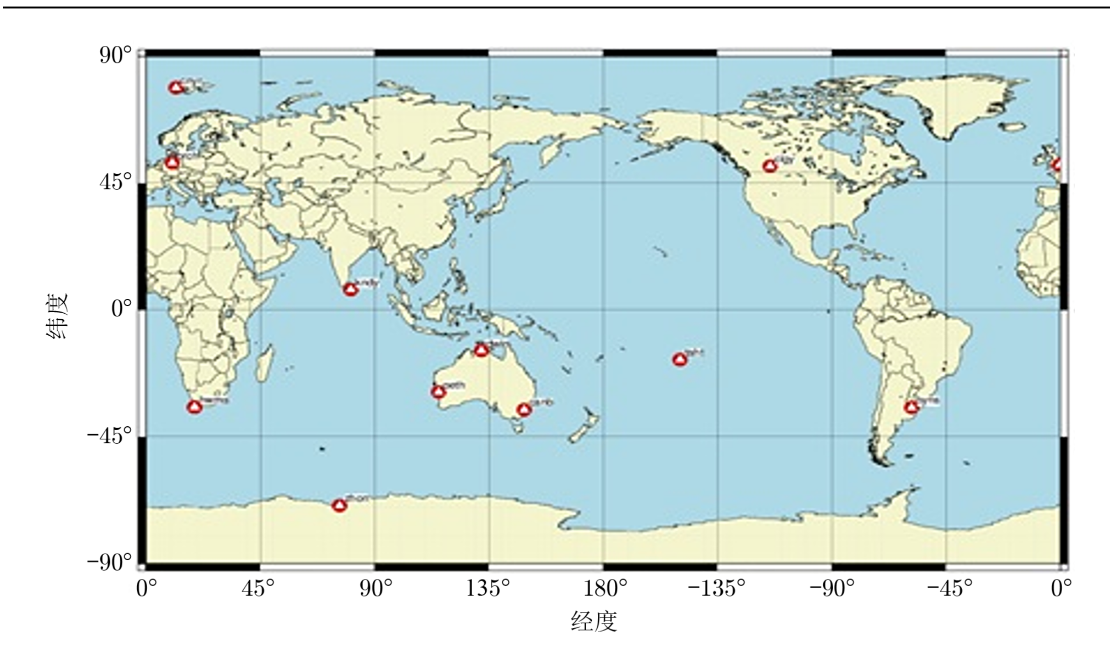


图 3 评估使用的 IGMAS 测站分布

务的可用性、漏警率和严重的完好性风险概率。在试验过程中，没有出现“严重的完好性风险”事件，各测站的完好性服务可用性 (即包络能力) 和漏警率统计结果见表 4。图 4 为全部测站 NPA 完好性服务可用性的综合统计结果。图 5 为 IGMAS 测站 canb 2020 年 3 月的水平误差与水平保护限值时间序列图。当月通过 $SISA$ 参数计算出的 HPL 对水平误差的包络能力为 100%。

表 4 IGMAS 各测站的完好性服务可用性 (即包络能力) 和漏警率统计

2019 年 7 月－12 月			2020 年 7 月－11 月		
测站	包络能力 /(%)	漏警率 /(%)	测站	包络能力 /(%)	漏警率 /(%)
Algr	98.77	0.000	Byns	100.000	0.000
Byns	99.81	0.027	Brch	100.000	0.000
Brch	99.58	0.000	Canb	100.000	0.001
Clgy	99.87	0.000	Clgy	100.000	0.000
Cnyr	99.97	0.000	Cnyr	100.000	0.000
Dwin	99.93	0.000	Dwin	100.000	0.000
Hmns	99.88	0.000	Icuk	100.000	0.000
Icuk	99.99	0.000	Kndy	100.000	0.000
Kndy	99.94	0.022	Peth	100.000	0.000
Peth	99.97	0.000	Rdjn	100.000	0.000
Taht	99.49	0.000	Zhon	100.000	0.000
平均	99.74	0.004	平均	100.000	0.000

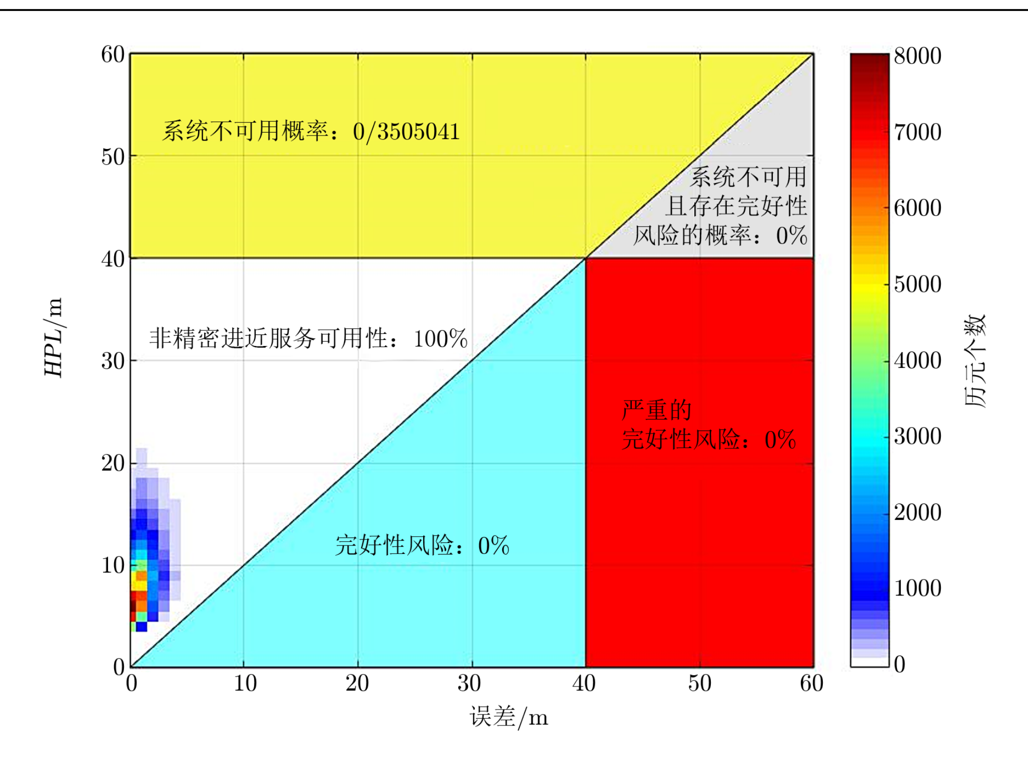


图 4　2020 年 7 月至 11 月 NPA 完好性服务可用性统计图

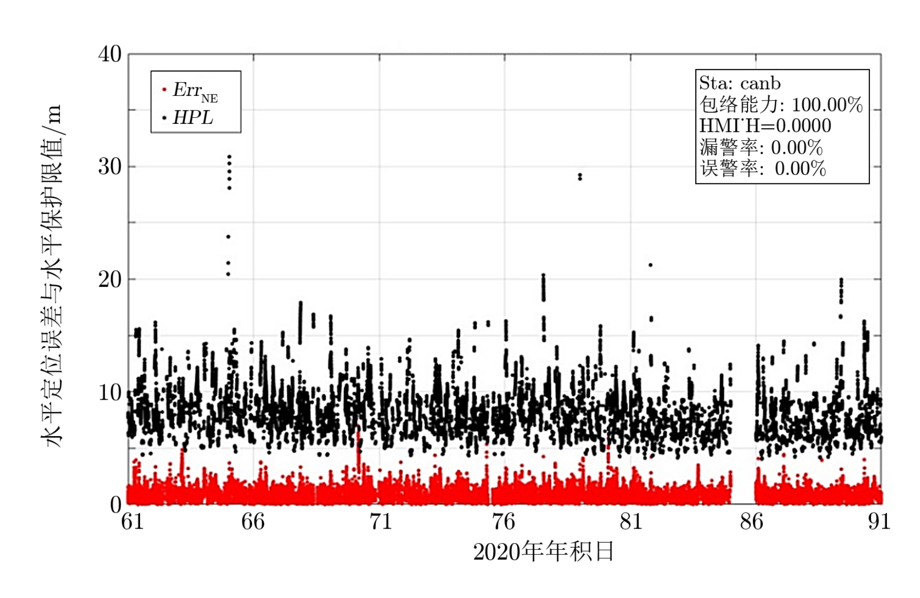


图 5　2020 年 3 月 canb 站 HPL/HPE 时间序列图

从评估结果可以看出，随着星座的逐步完善，系统的 NPA 完好性服务可用性逐渐增强。基本系统阶段 BDS-3 系统 NPA 服务可用性为 99.75%，全星座完整系统阶段 NPA 服务

可用性为 100.00%。

6 结 论

BDS-3 系统采用了全新的完好性设计体制，在广播星历中，通过播发 $SISAI$ 参数反映广播星历轨道和钟差信息的预测精度。由于系统开通服务时间尚短，目前 BDS-3 系统对用户公开的 ICD 文件中尚未给出 $SISA$ 参数的用户算法，影响了系统完好性服务的推广应用。本文设计了 $SISAI$ 的等级转换方法，并研究了 $SISA$ 参数的用户应用算法。利用 IGMAS 全球观测站实测数据，采用斯坦福图分析方法，对 $SISA$ 参数的完好性性能进行了验证分析。根据 BDS-3 系统的完好性服务目标，按照国际民航 NPA 阶段完好性服务指标要求，对 BDS-3 系统的 NPS 完好性服务能力进行了初步评估。实验结果显示，随着 BDS-3 系统星座建设的完善，系统的完好性服务能力增强，在全部星座部署完成后，BDS-3 系统对 NPA 阶段的完好性服务能力为 100%。本文研究的算法和试验结果可为深入开展 BDS-3 系统完好性服务能力评估提供重要参考。

参考文献：

[1] Department of Defense United States of America. Global Positioning System Precise Positioning Service Performance Standard. 2007

[2] Global positioning system standard positioning service performance standard. http://www.gps.gov/technical/ps/2008-SPS-performance-standard.pdf

[3] Oehler V, Luongo F, Boyero J P, et al. ION GNSS 17th International Technical Meeting of the Satellite Division, Long Beach: ION, 2004: 604

[4] Kovach K, Dobyne J, Crews M, et al. ION GNSS 2008, Savannah: GA, 2008: 2250

[5] Herraiz-Monseco E, Garcia A M, Miguel M, et al. ION GPS 2001, Salt Lake City: UT, 2001: 1916

[6] Yang Y, Xu Y, Li J, et al. Science China Earth Sciences, 2018, 61: 614

[7] 郭睿, 郑勇, 杜兰. 测绘科学技术学报, 2006, 23(6): 448

[8] 李作虎. 博士论文, 郑州: 解放军信息工程大学, 2012: 85

[9] Michael J. Dum, IS-GPS-705D, 2013

[10] Navigation Solutions Powered By EUROPE. European GNSS (GALIELO) open service Signal In Space Interface Control Document. http://galileognss.eu/wp-content/uploads/2015/12/Galileo_OS_SIS_ICD_v1.2.pdf

[11] 吕志伟. 全球定位系统, 2005, 30(5): 10

[12] Cao Y, Hu X, Chen J, et al. GPS Solutions, 2019, 23: 23

[13] 中国卫星导航系统管理办公室. 北斗卫星导航系统发展报告(4.0). http://www.beidou.gov.cn/xt/gfxz/201912/P020191227337020425733.pdf

[14] 陈金平, 曹月玲. 测绘学报, 2018, 47(S0): 1

[15] Integrity. http://www.navipedia.net/index.php/Integrity

[16] RTCA. Minimum Operational Performance Standards For Global Positioning System/Wide Area Augmentation System Airborne Equipment. RTCA DO-229D, December 13, 2006

[17] 中国卫星导航系统管理办公室. 北斗卫星导航系统空间信号接口控制文件公开服务信号(2.1).

http://www.beidou.gov.cn/xt/gfxz/P020180507527106075323.pdf

[18] 牛飞. 博士论文, 郑州: 信息工程大学, 2008: 75

[19] 国际民航组织. 国际民航组织公约附件 10 卷 1 无线助航设备节选 GNSS 标准和建议措施及指导材料. 北京: 中国航天标准化与产品保证研究院, 2012

[20] 杨鑫春, 李征航, 吴云. 测绘学报, 2011, 40: 68

The User's Algorithm and Performance Evaluation on *SISA* of BDS-3

YANG Jian[1,2], CAO Yue-ling[1]

(1. Shanghai Astronomical Observation, Chinese Academy of Science, Shanghai 200030, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The Beidou-3 global satellite navigation system was officially opened on the morning of July 31, 2020. With the gradual improvement of the Beidou system and the continuous improvement of its accuracy, users have higher and higher requirements for the integrity of the Beidou system. The BDS-3 system uses the four parameters ($SISAI_{\rm oe}$, $SISAI_{\rm ocb}$, $SISAI_{\rm oc1}$ and $SISAI_{\rm oc2}$) in the broadcast ephemeris to indicate the accuracy of the ephemeris and clock error parameters, but the four *SISAI* parameters have not yet been given user algorithms in the interface control document (ICD). The integrity service of the BDS-3 system cannot be applied in practice. This paper studies the level conversion algorithm and user algorithm of the basic integrity parameter *SISA* of the Beidou-3 system, and uses the International GNSS Monitoring and Assessment System global network data and *SISAI* parameters in the Beidou-3 satellite broadcast ephemeris in accordance with the integrity requirements of the International Civil Aviation Organization (ICAO) non-precision approach (NPA) and has conducted preliminary verification and analysis of the integrity and service performance of the BDS-3. The test results show that with the completion of the BDS-3 system and the *SISA* parameter algorithm adopted in this paper, the BDS-3 system's NPA stage integrity service capability is 100%.

Key words: BDS-3; integrity; *SISA* parameters; envelope